

文章编号:1671-4814(2015)02-104-12

德兴含铜埃达克质斑岩的地球化学特征、成因及地质意义^{*}

翁望飞,丁 勇

(安徽省地质矿产勘查局 332 队地调院,黄山 245000)

摘要:德兴斑岩铜矿位于扬子地块江南隆起带东缘,含矿斑岩类型为花岗闪长斑岩。岩石主矿物组合为斜长石(中长石、更长石)+石英+钾长石+角闪石+黑云母,常见副矿物为磁铁矿、磷灰石、榍石、钛铁矿和锆石。斑岩主量元素具有高硅($\text{SiO}_2=63.59\%$)、高铝($\text{Al}_2\text{O}_3=15.54\%$)、低镁($\text{MgO}=2.2\%$)的特征,岩石富钾贫钠($\text{K}_2\text{O}=3.06\%$; $\text{Na}_2\text{O}=3.67\%$),高 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (0.89)比; $\text{ALK}=6.66\%$, $\text{A}/\text{CNK}=1.086$, $\sigma=2.18$, $\text{A.R}=2.07$, 显示岩石为弱过铝质高钾钙碱性系列;稀土元素特征表现为轻稀土富集(121.81×10^{-6}),重稀土亏损(8.8×10^{-6}),具有较大的 LREE/HREE 比值(13.93);微量元素表现为富集大离子亲石元素 LILE(Rb、Ba、La、Sr)和亏损高场强元素 HFSE(Nb、Ta、Y),具低 $\text{Y}(11.21\times10^{-6})$ 和 $\text{Yb}(1.23\times10^{-6})$ 含量特征,有较高 $\text{Sr}/\text{Y}(57.29)$ 、 $\text{La}/\text{Yb}(28.93)$ 比值,具较高的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值(>0.7040),弱的负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.91$),以及负 ϵ_{Nd} 值等特征,表明德兴花岗闪长斑岩为“C”型高钾钙碱性埃达克岩,埃达克岩浆来源于活动陆缘加厚下地壳的部分熔融。

关键词:花岗闪长斑岩;埃达克岩;地球化学;岩石成因;地质意义;德兴

中图分类号:P581;P588;P591

文献标识码:A

埃达克岩(adakite)是 1990 年 Defant 和 Drummond 研究阿留申群岛的埃达克岛新生代火山岩厘定的一个新岩石类型,形成于岛弧,来源于年轻的($\leq 25\text{Ma}$)、热的俯冲洋壳部分熔融,具有标志性的地球化学特征^[1]。埃达克岩概念在地学界引起了广泛关注,张旗等学者^[2-4]将埃达克岩划分为“O”型和“C”型,认为“O”型埃达克岩由年轻洋壳板片俯冲熔融形成,“C”型埃达克岩则源于下地壳基性岩的部分熔融。(超)大型斑岩型铜金铂银矿床的含矿斑岩常具埃达克岩特征,因此研究含铜斑岩体的埃达克岩地球化学特征有助于提高斑岩型矿床的再认识,为斑岩型矿床的勘探提供有益的理论依据。

赣东北成矿带是中国东部成矿域铜金铂多金属成矿带的重要组成部分,区内发育了以花岗闪长(斑)岩、石英闪长(斑)岩等为主的高钾钙碱性侵入岩,产出 40 余处斑岩型铜金矿床。德兴斑岩型铜矿床即是该带上与花岗闪长斑岩有关的典型矿床之一,是中国乃至亚洲最大的露天开采铜矿床。研究表明,与德兴斑岩型铜矿具有密切成因联系的花岗闪长斑岩为 I 型花岗岩,并以此为方向进行了的岩

石学、矿物学探讨,尤其是近几年有关该矿床地质特征^[5-6]、热液蚀变^[7-10]、成矿物质来源^[11-15]、成矿流体包裹体^[16-22]、同位素地球化学特征^[23-24]、成岩成矿年代学^[25-27]及矿床成因模型^[28-29]等方面开展了很多工作。但从现有资料看,该矿床缺少与埃达克岩相关的研究成果,目前仅个别学者如王强等^[30]、张旗等^[3]、李印等^[31]、冷成彪等^[32]文章中,见有德兴含铜斑岩体属于埃达克岩的观点,且仅为点名式提及,没有进一步对其进行相关地球化学和岩石成因的研究。由于德兴斑岩体与铜、金成矿关系密切,不仅为成矿提供物质来源,且为成矿提供流体和热力条件。因此,从埃达克岩角度对德兴斑岩进行地球化学特征研究,不但能证实德兴斑岩体可能属于埃达克岩,还能为该地区斑岩型铜金铂银多金属矿床的勘探提供从埃达克岩角度思考的新方向。

1 区域地质及年代学进展

德兴地区位于扬子地块内江南隆起带东缘,靠近扬子地块与华夏地块新元古代的碰撞缝合线—江山—绍兴断裂带(图 1a)。研究区主要发育北东向

^{*} 收稿日期:2014-05-17 改回日期:2014-07-29 责任编辑:汪建宁

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“安徽休宁县-歙县金多金属矿整装勘查区关键基础地质研究(项目编号:12120114028501)。

第一作者简介:翁望飞,1980 年生,男,高级工程师,从事区域地质矿产调查工作。

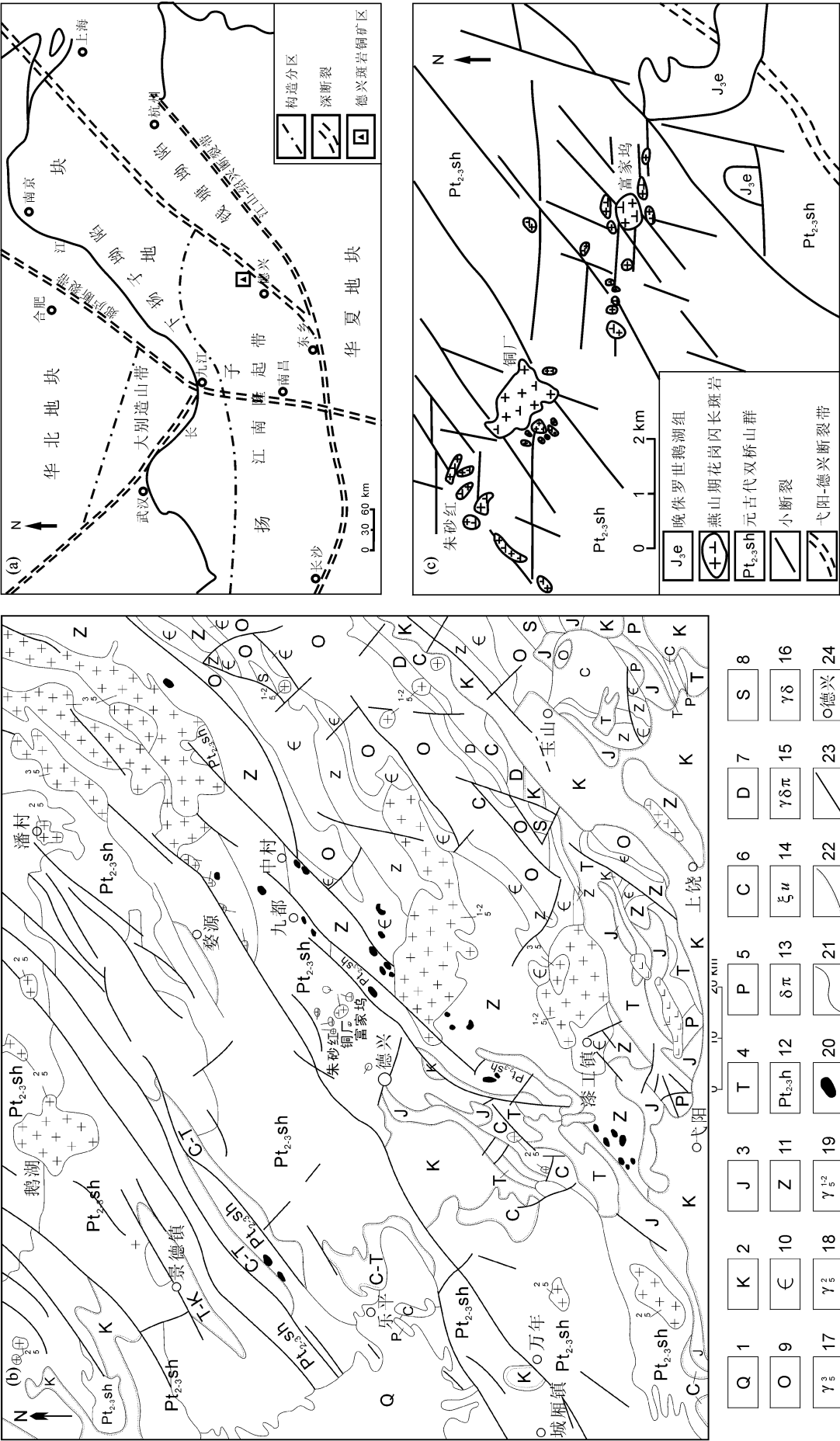


图1 江西德兴斑岩铜矿区大地构造位置图(a)、矿区地质图(b)及花岗岩长斑岩侵入体分布图(c)(据文献[33]修改)

1-第四系;2-白垩系;3-侏罗系;4-三叠系;5-二叠系;6-石炭系;7-泥盆系;8-志留系;9-奥陶系;10-寒武系;11-震旦系;12-中-新元古界双桥山群(未分组);13-正长斑岩;14-英安玢岩;15-燕山早期花岗岩;16-燕山早期花岗岩;17-燕山晚期花岗岩;18-燕山早期花岗岩;19-印支-燕山早期花岗岩;20-基性-超基性岩;21-地质界线;22-不整合;23-断裂;24-地名

和近东西向两组断裂,其中规模最大的为位于东部的弋阳—德兴断裂带(图 1b)。德兴含铜斑岩体主要包括三个共生侵入的花岗闪长斑岩体,分别为铜厂、富家坞、朱砂红(图 1c),其中铜厂斑岩体地表出露面积最大(0.7km^2)。这些花岗闪长斑岩所侵入的围岩为中-新元古代双桥山群(Pt_{2-3}sh)浅变质沉积灰岩、凝灰质千枚岩和绢云母千枚岩等。资料显示,德兴花岗闪长斑岩体的形成时代在 $157\sim 193\text{Ma}$ 。江西省地质调查院(2002)用黑云母 K-Ar 法测定铜厂斑岩年龄为 $163\sim 170\text{Ma}$ 和 193Ma ,全岩 Rb-Sr 法年龄为 $172\sim 179\text{Ma}$;富家坞斑岩 Rb-Sr 法年龄为 157Ma 和 166Ma ;朱砂红斑岩 Rb-Sr 法年龄为 161Ma 。朱训等^[33]对铜厂斑岩体的 Rb-Sr 法年龄为 172Ma ,K-Ar 法为 168Ma ;对富家坞斑岩体内的石英钾长石脉 K-Ar 法年龄为 157Ma 。王强等(2004)^[25]SHRIMP 锆石 U-Pb 法测定铜厂和富家坞斑岩体的年龄为 $171\pm 3\text{Ma}$;水新芳等(2012)^[27]利用 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,获得 3 个斑岩体年龄,分别为:铜厂 $171\pm 1.2\text{Ma}$ 、富家坞 $172\pm 0.68\text{Ma}$ 、朱砂红 $173\pm 1.3\text{Ma}$ 。Liu Xuan et al. (2012)^[34]发表了铜厂斑岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $172.5\pm 0.5\text{Ma}$ 。Zhou Qing et al. (2012)^[24]对德兴铜矿铜厂、富家坞、朱砂红 3 个矿区的含矿斑岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,其锆石加权平均年龄分别为 $171\pm 0.84\text{Ma}$ 、 $170.16\pm 0.88\text{Ma}$ 和 $170.73\pm 0.84\text{Ma}$ 。这些年龄表明德兴花岗闪长斑岩形成于早侏罗世末-中侏罗世,属燕山构造运动期。燕山期时,中国东部地区进入了大陆边缘滨太平洋构造域发展阶段,古太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲,形成了活动大陆边缘环境,俯冲大洋板片及上覆沉积物部分熔融形成了高钾钙碱性熔体^[15],即为德兴含铜花岗闪长斑岩体的岩浆源。

2 岩石学及地球化学特征

2.1 岩石学特征

德兴含铜斑岩体的岩性基本一致,从花岗岩类定量矿物分类(QAP)图解(图 2)看,主体为花岗闪长斑岩。斑岩体岩石定量矿物成分见表 1,与埃达克岩主要造岩矿物组合和常见副矿物组合相比,德兴花岗闪长斑岩含有一定量的钾长石,未见暗色矿物辉石,但角闪石和黑云母的存在及一致的副矿物组合均表明德兴花岗闪长斑岩具有埃达克岩的矿物学特征。需要说明的是,德兴花岗闪长斑岩体存在有不同程度的热液蚀变,其蚀变强度以岩体核部未蚀变斑岩为中心,向岩体南北外侧呈环带状对称分布,按热液温度和蚀变时间可划分出 4 个蚀变带:钾化带、绢云母—硅化带、伊利石化带和绿泥石—碳

酸盐化带,各个蚀变带之间相互叠加,形成中心式多阶段复合热液蚀变晕圈^[18, 23]。花岗闪长斑岩不同程度的蚀变分带伴随元素迁移,使斑岩体主量元素及微量元素发生变化,可能会混淆对埃达克岩地球化学性质的判断。

2.2 主量元素特征

德兴花岗闪长斑岩主量元素地球化学分析如表 2,表 2 显示新鲜的花岗闪长斑岩与遭受热液蚀变的斑岩在主量元素含量上有明显差异,其中未蚀变的花岗闪长斑岩体具有以下主量元素地球化学特征:

(1)岩石主量元素具有高硅、高铝、低镁的特征。 SiO_2 为 $59.51\%\sim 68.08\%$,平均 63.59% ($> 56.0\%$); Al_2O_3 为 $14.67\%\sim 18.13\%$,平均 15.54% ($> 15.0\%$); MgO 为 $0.87\%\sim 3.6\%$,平均 2.2% ($< 3.0\%$)。

(2)岩体富 K 贫 Na,具相对较高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值。岩石 K_2O 为 $1.71\%\sim 4.46\%$,平均 3.06% ; Na_2O 为 $0.1\%\sim 5.0\%$,平均 3.6% 。 Na_2O 平均 3.67% (文献[35]的铜厂-2 编号 Na_2O 值 0.1% 未计入); $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 $0.43\sim 3.29$,平均 0.89 。该比值相对于 Defant *et al.* 埃达克岩定义中的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}< 0.5$ 明显高,表明德兴斑岩体相对富钾。

(3)岩石属弱过铝高钾钙碱性系列。岩石 A/CNK 为 $0.92\sim 1.61$,平均 1.086 ;全碱 ALK 为 $4.56\%\sim 7.99\%$,平均 6.66% ;碱度率 A.R 为 $1.37\sim 2.55$,平均 2.07 ;里特曼指数 σ 为 $1.09\sim 3.27$,平均 2.18 。 SiO_2 - K_2O 图(图 3)显示,斑岩体为中钾-高钾钙碱性系列。

(4)具较低 $\text{Mg}^\#$ 的特征。斑岩体的 $\text{Mg}^\#$ 为 $20.8\sim 57.94$,平均 38.59 ,相对于 Defant *et al.* 埃达克岩定义中的 $\text{Mg}^\#$ (≈ 51)明显较低,表明德兴斑岩体可能直接由地壳板片熔融形成,没有或较少程度受幔源物质混染。 Na_2O - CaO 图和 Na_2O - MgO 图(图 4)及 MgO - SiO_2 图(图 5)显示未蚀变的德兴花岗闪长斑岩均落入埃达克岩区内,表明其具有埃达克岩的主量元素地球化学特征。

相比较遭受蚀变的斑岩体部分主量元素含量发生明显变化。表 2 中注明来源于文献[28]编号从铜厂-1~铜厂-20 的样品发生不同程度的绿泥石化、伊利石化、硅化、绢云母化蚀变,且随编号的增大,蚀变程度逐渐加强,铜厂-1~铜厂-3 为微弱蚀变,可视为未蚀变,元素迁移变化程度也较低;而铜厂-15~铜厂-20 为中-强蚀变,元素迁移变化程度也较高。各主量元素中含量基本未发生改变的为 SiO_2 (平均 62.66%)、 MgO (平均 2.05%)、 CaO (平均 3.64% ,未蚀变为 3.58%)、 K_2O (2.79%)。有少量变化的为 MnO ,从未蚀变的 0.11% ,转变为蚀变的 0.06% ,略有减少; P_2O_5 也从平均值 0.22% 减少为

表 1 德兴花岗闪长斑岩体岩石矿物成分表(%)

Table 1 Mineral compositions (%) of the Dexing granodiorite-porphyries

岩体	岩性	石英	斜长石	钾长石	角闪石	黑云母	其它	资料来源
富家坞-1	花岗闪长斑岩	18.0	55.0	13.0	7.0	3.0	4.0	
富家坞-2	花岗闪长斑岩	23.0	43.0	16.0	10.0	5.0	3.0	
富家坞-3	花岗闪长斑岩	21.0	48.0	18.0	8.0	4.0	1.0	
富家坞-4	花岗闪长斑岩	20.0	49.0	15.0	8.0	7.0	1.0	
	平均	20.56	48.75	15.5	8.25	4.75	2.25	
铜厂-1	花岗闪长斑岩	16.47	50.76	15.24	10.79	4.51	2.23	
铜厂-2	花岗闪长斑岩	18.0	48.0	14.0	10.0	9.0	1.0	[33]
铜厂-3	花岗闪长斑岩	19.95	48.75	17	9.5	3.35	1.45	
铜厂-4	花岗闪长斑岩	22.2	52.4	14.1	7.5	2.2	1.6	
铜厂-5	花岗闪长斑岩	22.29	46.35	16.08	10.04	2.62	2.63	
铜厂-6	花岗闪长斑岩	18.0	50.0	14.0	9.0	8.0	1.0	
	平均	19.49	49.38	15.07	9.47	4.95	1.64	
朱砂红	花岗闪长斑岩	20.0	49.0	14.0	9.0	6.0	2.0	

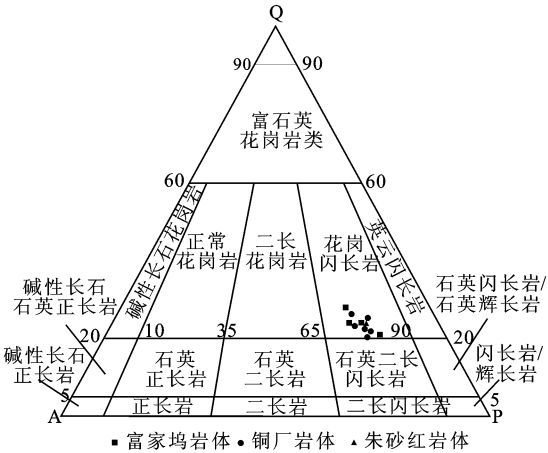


图 2 德兴含铜斑岩体 QAP 图

Fig. 2 QAP diagram for the Dexing copper-bearing porphyry

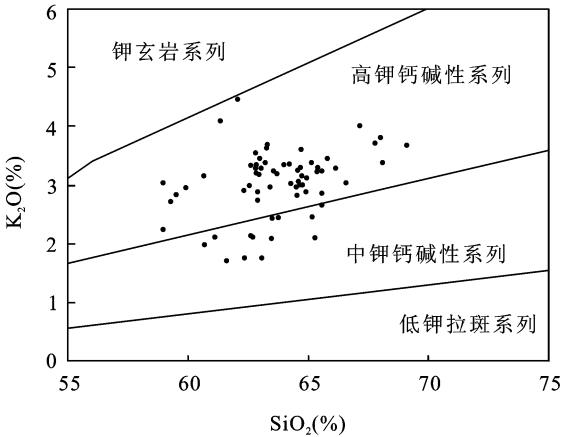


图 3 德兴含铜斑岩体 SiO₂-K₂O 图

Fig. 3 SiO₂-K₂O diagram for the Dexing copper-bearing porphyries

表 2 德兴花岗闪长斑岩主量元素含量(%)

Table 2 Major element contents (%) of the Dexing granodiorite-porphyries

岩体	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	备注	资料来源
铜厂-1	62.32	0.45	15.79	2.52	2.88	0.08	2.55	4.1	4.23	2.9	0.25	石英二长闪长玢岩	[33]
铜厂-2	63.7	0.4	14.88	1.77	2.64	0.05	2.07	4.32	3.71	3.19	0.25	花岗闪长斑岩	[33]
铜厂-3	63.54	0.45	15.46	2.93	1.97	0.05	2.52	3.84	3.39	3.24	0.23	花岗闪长斑岩	[33]
铜厂-4	63.22	0.45	15.07	2.55	2.89	0.05	2.55	3.83	3.78	3.38	0.25	花岗闪长斑岩	[33]
铜厂-5	63.25	0.43	15.65	3.21	1.56	0.04	2.77	4.42	3.68	3.63	0.23	花岗闪长斑岩	[33]
铜厂-6	62.6	0.45	15.58	2.73	2.59	0.08	2.55	4.5	4.0	3.33	0.25	花岗闪长斑岩	[33]
铜厂-7	62.82	0.45	15.11	2.06	2.8	0.08	2.55	4.33	3.89	3.2	0.3	花岗闪长斑岩	[33]
铜厂-8	62.81	0.44	15.29	3.0	1.98	0.08	2.83	3.8	3.37	3.55	0.24	花岗闪长斑岩	[33]
铜厂-9	62.88	0.41	15.6	1.26	4.34	0.31	2.04	4.08	3.63	2.88	0.24	花岗闪长斑岩	[33]
铜厂-10	62.89	0.41	15.47	1.56	3.56	0.24	2.1	4.31	3.61	2.74	0.24	花岗闪长斑岩	[33]
铜厂-11	59.9	0.45	15.02	2.06	3.7	0.03	3.45	4.7	3.3	2.95	0.33	石英闪长玢岩	[33]
铜厂-12	60.66	0.5	15.64	2.02	3.51	0.08	3.6	4.72	3.5	3.15	0.3	石英闪长玢岩	[33]
铜厂-1	62.99	0.38	14.67	2.03	3.45	0.053	2.43	3.97	3.57	3.45	0.26	花岗闪长斑岩	[36]
铜厂-2	59.51	0.44	15.25	1.8	5.46	0.055	2.94	4.45	3.34	2.83	0.33	花岗闪长斑岩	[36]
铜厂-3	64.7	0.44	15.27	1.06	3.02	0.03	2.03	3.76	3.82	3.6	0.45	花岗闪长斑岩	[36]
铜厂-4	64.49	0.46	15.08	1.18	2.96	0.1	2.24	4.41	3.97	2.96	0.3	花岗闪长斑岩	[36]
铜厂-5	60.67	0.54	16.3	1.57	3.66	0.12	2.84	5.5	4.12	1.98	0.39	花岗闪长斑岩	[36]
铜厂-6	59.9	0.45	15.02	2.06	3.7	0.03	3.45	4.7	3.3	2.95	0.33	花岗闪长斑岩	[36]

续表 2

岩体	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	备注	资料来源
铜厂-1	63.03	0.44	15.42	2.5	2.57	0.09	2.24	4.02	3.72	3.28	0.24	花岗闪长斑岩	[35]
铜厂-2	62.06	0.45	16.01	4.08	3.04	0.05	1.3	2.09	0.1	4.46	0.35	花岗闪长斑岩	[35]
铜厂-3	62.32	0.45	15.79	2.52	2.88	0.08	2.55	4.1	4.23	2.9	0.25	花岗闪长斑岩	[35]
铜厂-4	62.81	0.44	15.29	3.0	1.98	0.08	2.83	3.8	3.37	3.55	0.24	花岗闪长斑岩	[35]
铜厂-5	62.94	0.43	15.44	2.33	2.74	0.32	2.42	4.13	3.77	3.18	0.24	花岗闪长斑岩	[35]
铜厂-6	62.89	0.41	15.47	1.56	3.56	0.24	2.1	4.31	3.6	2.74	0	花岗闪长斑岩	[35]
铜厂	62.81	0.46	15.37	2.2	2.64	0.06	2.54	3.84	3.77	3.29	0.24	花岗闪长斑岩	[12]
铜厂-1	64.26	—	15.38	—	5.16*	—	2.15	3.29	3.59	3.02	0.24	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-2	64.56	—	15.19	—	5.29*	—	1.89	3.2	3.05	3.25	0.21	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-3	64.59	—	15.76	—	4.26*	—	2.08	3.03	3.48	3.06	0.23	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-4	65.39	—	15.94	—	4.47*	—	2.23	2.81	3.68	3.3	0.24	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-5	64.52	—	15.4	—	4.73*	—	2.17	3.44	3.41	2.82	0.22	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-6	63.29	—	15.81	—	5.35*	—	2.3	3.9	1.12	3.69	0.22	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-7	61.6	—	15.06	—	4.67*	—	2.2	4.8	3.9	1.71	0.25	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-8	62.7	—	15.34	—	4.87*	—	2.13	3.91	3.72	2.11	0.26	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-9	62.55	—	18.13	—	5.24*	—	1.19	1.74	5	2.99	0.11	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-10	65.56	—	15.73	—	5.45*	—	2.16	2.2	3.97	2.66	0.25	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-11	66.56	—	15.07	—	4.59*	—	2.03	2.2	3.69	3.04	0.22	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-12	63.07	—	15.37	—	5.24*	—	2.13	3.32	3.72	1.75	0.24	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-13	67.13	—	15.84	—	4.68*	—	1.65	1.81	3.71	4.01	0.16	花岗闪长斑岩	[18]
铜厂-1	62.34	0.55	19.08	1.74	2.66	0.11	2.07	3.12	4.05	1.75	0.15	花岗闪长斑岩， 微弱蚀变	[28]
铜厂-2	62.61	0.52	19.32	1.86	2.0	0.1	2.07	3.2	4.39	2.14	0.12		[28]
铜厂-3	65.16	0.46	18.02	2.52	2.0	0.13	2.07	2.16	3.25	2.45	0.17		[28]
铜厂-4	58.96	0.09	18.71	2.67	2.6	0.21	2.01	4.3	1.82	2.24	0.21	花岗闪长斑岩，绿泥 石、伊利石化弱蚀变	[28]
铜厂-5	53.43	0.18	19.32	3.34	4.0	0.15	4.86	6.13	0.4	1.08	0.19		[28]
铜厂-6	64.91	0.07	18.3	1.93	1.2	0.01	1.2	3.41	0.94	2.88	0.08		[28]
铜厂-7	63.74	0.09	17.02	2.77	1.05	0.04	2.29	5.04	1.67	2.44	0.2	—	[28]
铜厂-8	64.92	0.01	17.63	2.79	1.1	0.02	1.58	3.85	0.44	3.12	0.1	花岗闪长斑岩，硅化、 绿泥石化、弱绢云母 化弱-中蚀变	[28]
铜厂-9	63.48	0.01	15.95	2.39	3.7	0.06	2.13	4.74	0.12	2.43	0.08		[28]
铜厂-10	61.1	0.09	20	3.46	0.9	0.04	2.2	4.22	0.84	2.11	0.13		[28]
铜厂-11	65.12	0.03	17.4	3.21	1.7	0.05	1.54	2.9	0.24	3.38	0.15	花岗闪长斑岩，具 硅化、绿泥石化、弱绢 云母化中蚀变	[28]
铜厂-12	58.95	0.01	18.71	2.32	1.1	0.09	2.17	5.6	0.46	3.03	0.19		[28]
铜厂-13	63.98	0.01	18.46	6.0	0.9	0.08	1.22	1.12	0.28	3.34	0.14		[28]
铜厂-14	63.42	0.01	18.24	2.72	1.3	0.01	1.99	4.29	0.19	2.97	0.07	—	[28]
铜厂-15	55.58	0.07	19.86	2.96	3.0	0.11	2.77	5.43	0.31	2.44	0.07	花岗闪长斑岩，具硅 化、绢云母化中- 强蚀变	[28]
铜厂-16	63.47	0.12	17.4	2.64	0.95	0.03	2.14	3.82	1.77	2.09	0.16		[28]
铜厂-17	59.27	0.12	19.16	2.89	5.52	0.03	2.76	3.55	0.24	2.71	0.08		[28]
铜厂-18	67.78	0.01	20.24	1.64	0.85	0.04	1.32	0.44	0.5	3.71	0.08	花岗闪长岩，硅化、绢 云母化强蚀变	[28]
铜厂-19	69.1	0.01	18.26	2.53	0.7	0.06	1.51	1.63	0.56	3.67	0.04		[28]
铜厂-20	68.01	0.01	18.86	3.27	0.5	0.03	1.19	1.46	0.25	3.81	0.12		[28]
铜厂	65.28	0.53	15.18	0.99	3.02	0.12	2.43	2.24	3.51	2.1	0.08	花岗闪长斑岩	[30]
富家坞	68.08	0.44	15.33	1.44	2.18	0.03	1.82	1.42	3.46	3.38	0.1	花岗闪长斑岩	[30]
富家坞-1	64.64	0.4	15.34	1.44	2.91	0.08	1.88	3.38	3.93	3.0	0.25	花岗闪长斑岩	[33]
富家坞-2	64.76	0.42	15.38	1.88	3.1	0.75	1.83	3.86	4.0	3.0	0.21	花岗闪长斑岩	[33]
富家坞-3	65.8	0.42	15.56	1.71	2.04	0.09	1.37	2.99	3.91	3.45	0.2	花岗闪长斑岩	[33]
富家坞-4	64.74	0.45	15.9	1.85	2.87	0.11	2.09	4.66	3.22	3.15	0.28	花岗闪长斑岩	[33]
富家坞-5	64.21	0.41	16.67	1.45	2.1	0.06	1.36	3.63	4.3	3.35	0.15	花岗闪长斑岩	[33]
富家坞-6	66.13	0.36	15.6	1.83	2.05	0.06	1.62	2.89	3.84	3.28	0.16	花岗闪长斑岩	[33]
富家坞-1	65.37	0.41	15.48	1.8	2.51	0.16	1.6	3.37	3.94	3.23	0.2	花岗闪长斑岩	[35]
富家坞-2	65.56	0.4	15.51	1.8	2.4	0.14	1.61	3.25	3.9	3.24	0	花岗闪长斑岩	[35]
富家坞-3	64.2	0.41	16.67	1.45	2.1	0.06	1.36	3.63	4.3	3.35	0	花岗闪长斑岩	[35]
富家坞-4	65.56	0.38	16.11	3.72	2.57	0.1	0.87	3.7	4.32	2.86	0.18	花岗闪长斑岩	[35]
朱砂红	64.47	0.49	14.97	1.55	2.6	0.11	2.35	4.5	3.57	3.3	0.26	花岗闪长斑岩	[30]
朱砂红	62.82	0.4	15.24	0.72	2.52	0.03	2.41	3.17	3.84	3.34	0.25	花岗闪长斑岩	[33]
朱砂红	61.34	0.6	15.61	3.64	2.68	0.03	2.86	1.81	1.35	4.09	0	花岗闪长斑岩	[35]

注：带“*”的数据为 FeO_T，即全铁含量

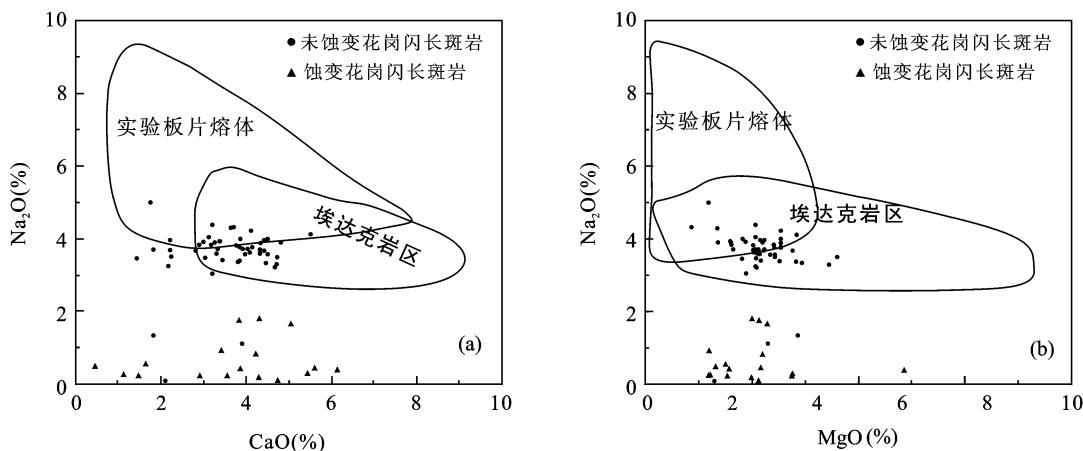


图 4 德兴含铜斑岩体埃达克岩 CaO-Na₂O(a)及 MgO-Na₂O(b)判别图

Fig. 4 CaO-Na₂O(a) and MgO-Na₂O (b) discrimination diagrams for the adakites of the Dexing copper-bearing porphyries

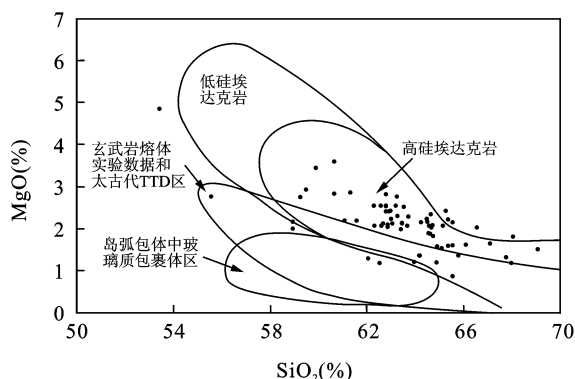


图 5 德兴含铜斑岩体埃达克岩 SiO₂-MgO 判断图(据文献[38-40]修改)

Fig. 5 SiO₂-MgO discrimination diagram of the adakites of the Dexing copper-bearing porphyries

0.12%。而含量变化最大的为 TiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、FeO、Na₂O,其中 TiO₂ 由未蚀变的 0.44% 减少到蚀变后的 0.055%;FeO 由未蚀变的 2.8% 减少到蚀变后的 1.83%;Na₂O 由未蚀变的 3.67% 减少到蚀变后的 0.65%;而 Al₂O₃ 则由未蚀变的 15.54% 增加到蚀变后的 18.5%;Fe₂O₃ 亦由未蚀变的 2.07% 增加到蚀变后的 2.91%。表明斑岩中的角闪石、黑云母、钾长石等矿物受热液影响蚀变后成为富铝、富 Fe⁺³ 价铁的绢云母、伊利石、绿泥石等次生矿物。而主量元素含量的变化会改变岩石的地球化学特征,从而干扰利用元素含量图解判别岩石类型。图 4 所示,未蚀变的斑岩体数据多集中于埃达克岩区,而由于蚀变斑岩体的 Na₂O 含量减少,使得蚀变的花岗闪长斑岩数据均投影于埃达克岩区之外,表明蚀变部分改变了斑岩的埃达克岩地球化学特征。

2.3 稀土元素与微量元素

从德兴花岗闪长斑岩的稀土及微量元素地球化学数据(数据略)可知德兴斑岩稀土及微量元素特征如下:

(1)该斑岩稀土元素含量较高,呈轻稀土富集、重稀土亏损的特点。稀土总量 REE 为 $(55.95 \sim 194.47) \times 10^{-6}$,平均 130.61×10^{-6} ;LREE 值为 $(51.74 \sim 183.18) \times 10^{-6}$,平均 121.81×10^{-6} ;HREE 为 $(4.21 \sim 13.93) \times 10^{-6}$,平均 8.8×10^{-6} ;具有较大的 LREE/HREE 比值(9.65~18.66),平均 13.93。斑岩稀土元素球粒陨石标准化配分型式图(图 6a)显示为显著陡右倾型,表明轻、重稀土元素分异明显。

(2)斑岩体的微量元素表现为富集 LILE(Rb、Ba、La、Sr)和相对亏损 HFSE(Nb、Ta、Y),在微量元素球粒陨石标准化蛛网图上(图 6b)呈现显著的 Nb、Ta 负异常。

(3)埃达克岩指标性元素 Y 和 Yb 明显呈低值,而 Sr 相对富集,其 Y 为 $(5.04 \sim 16.3) \times 10^{-6}$,平均 11.21×10^{-6} ,小于埃达克岩的界限值(18×10^{-6});Yb 为 $(0.6 \sim 2.04) \times 10^{-6}$,平均 1.23×10^{-6} ,小于埃达克岩的界限值(1.9×10^{-6});对于 Sr 元素,发现遭受热液蚀变的花岗闪长斑岩 Sr 元素流失明显,未蚀变的斑岩体中 Sr 元素为 $(230.99 \sim 15241.87) \times 10^{-6}$,平均 798.72×10^{-6} (源自文献[11]的铜厂-2 样品 Sr 数据未计入平均),远大于埃达克岩的限定值(400×10^{-6});遭弱—中等程度蚀变的斑岩体中 Sr 元素为 $(228 \sim 1018) \times 10^{-6}$,平均 367.46×10^{-6} ,接近 400×10^{-6} ;而遭受强蚀变的斑岩体中 Sr 仅为 $(21.8 \sim 35.8) \times 10^{-6}$,平均 28.6×10^{-6} ,远低于 400×10^{-6} ,在微量元素蛛网图中亦显示显著的负异常谷,已不具埃达克岩地化特征。Sr 元素的变化在图 7 中表现较明显,未蚀变的斑岩数据均投影于埃达克岩区,而遭受蚀变的斑岩体则落入低 Sr 低 Yb 型花岗岩区内。

(4)德兴花岗闪长斑岩具有较高的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值以及较低的 ε_{Nd} 值。朱训等^[33]测试铜厂斑岩体 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.704931~0.705430;王强等^[25]测

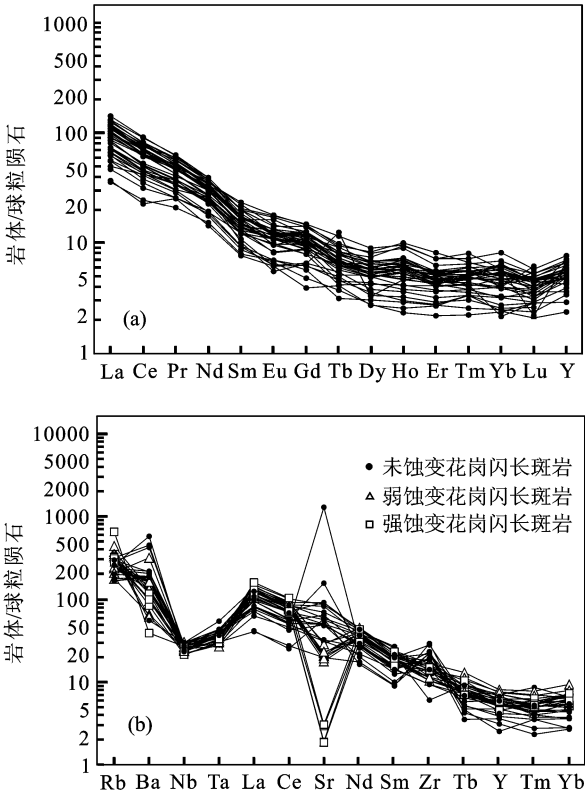


图 6 德兴含铜斑岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)及微量元素球粒陨石标准化蛛网图(b)
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns(a) and chondrite-normalized trace elements spidergram(b) for the Dexing copper-bearing porphyries

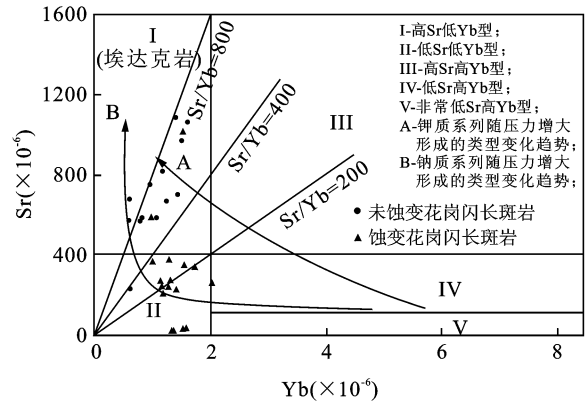


图 7 德兴含铜斑岩体 Sr-Yb 元素分类图(底图据文献^[43])
Fig. 7 Sr-Yb classification diagram for the Dexing copper-bearing porphyries

试铜厂斑岩体⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.705028~0.705409, 朱砂红为 0.705297, 铜厂为 0.705511~0.7059582;测定 ϵ_{Nd} 为-1.14~1.8;金章东等^[23] 结果表现出分带性,从钻孔岩体中心到热液蚀变接触带再至围岩,其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值逐渐增大,而 ϵ_{Nd} 则逐渐减小,其中未蚀变的斑岩体⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.70508~0.70857, ϵ_{Nd} 为-0.76~-3.08。德兴花岗闪长斑岩具有高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr,低 ϵ_{Nd} 特征不同于 Defant *et al.*^[1] 定义的埃达

克岩(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr<0.7040, ϵ_{Nd} >0),原因在于 Defant 定义的埃达克岩为俯冲洋壳板片熔融,混染有含量较高的地幔物质成分,而德兴花岗闪长斑岩的形成物质来源于地壳为主。

(5) 德兴斑岩具微弱的负 Eu 异常,其 δEu 在 0.68~1.17 之间,平均 0.91,亏损不明显,在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线上表现较平直,没有明显的负异常谷。

(6) 斑岩体具有较高的 La/Yb, (La/Yb)_N, Sr/Y, Y/Yb 比值。其中 La/Yb 为 17.99~40.68, 平均 28.93; (La/Yb)_N 为 12.16~27.49, 平均 19.55; Sr/Y 为 16.07~238.67, 平均 57.29(去掉文献^[11] 中铜厂-2 样品的异常 Sr 数据和 4 个蚀变严重的样品 Sr 数据); Y/Yb 为 6.71~11.89, 平均 9.37。在 Sr/Y-Y 图解(图 8a)及 (La/Yb)_N-Yb_N 图解(图 8b) 中,斑岩体投影大多落入埃达克岩区内,仅 4 个蚀变较为强烈的样品,因 Sr 元素流失严重而落于区外。

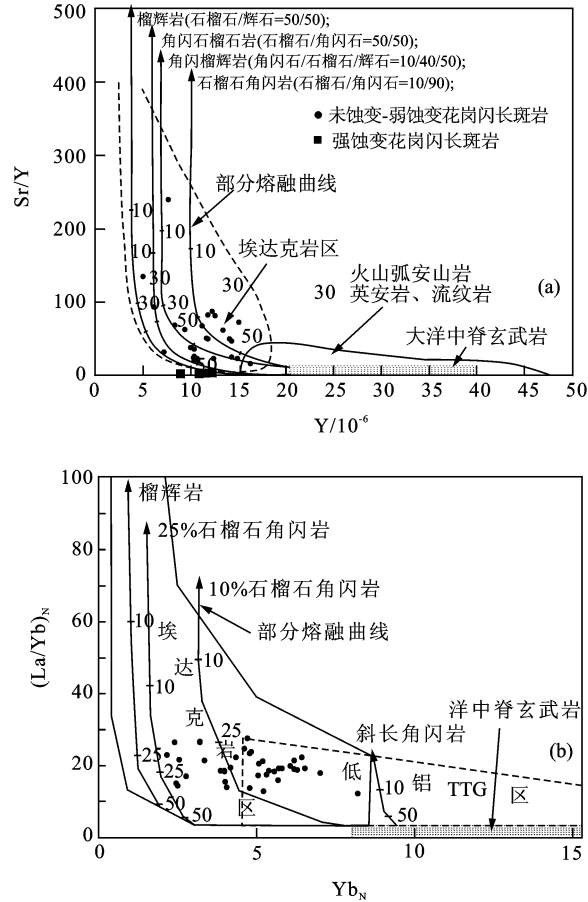


图 8 德兴含铜斑岩体埃达克岩 Sr/Y-Y(a)和 (La/Yb)_N-Yb_N(b)判别图
Fig. 8 Sr/Y-Y(a) and (La/Yb)_N-Yb_N(b) discrimination diagrams for the adakites of the Dexing copper-bearing porphyries

2.4 对比与类型

德兴花岗闪长斑岩与 Defant 定义的“O”型埃

达克岩和张旗等拓展的“C”型埃达克岩对比,其主要的地球化学指标较为一致。德兴斑岩的高硅、高铝、低镁($\text{SiO}_2 > 56.0\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$, $\text{MgO} < 3.0\%$)特征微量元素和稀土元素显示富集 LILE 和 LREE 而相对亏损 HFSE 和 HREE,具较高的 LREE/HREE 比值;指标性元素 $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$,富集 Sr,无明显 δEu 负异常;具有 Sr/Y、La/Yb 高比值等特征,均符合埃达克岩的地球化学特征。他们之间的主要区别在于:

(1) “O”型埃达克岩的 Al_2O_3 含量较高,一般在 $15.0\% \sim 20.0\%$ 间,而德兴花岗闪长斑岩含量较低,未蚀变的斑岩体 Al_2O_3 仅为 15.54% ,图 9a 中的 SiO_2 - Al_2O_3 图解表达了这种差异。此外,“O”型埃达克岩 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值较小(< 0.5),而德兴斑岩通常则富钾贫钠,其 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值较大(平均 0.89)。高 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值特点可能是岩浆源区成分的差异或壳源物质的混染所致,但也不排除有富钾幔源物质的混染。这也说明了德兴斑岩中含有一定量的钾长石,而富 Na 元素的角闪石则较“O”型埃达克岩要低。

(2) Yogodzinski、Kay 等把“O”型埃达克岩又称为镁质安山岩^[54-55],表明其具有高 MgO ($\text{Mg}^\#$ 平均 51)、高 Cr(平均 165×10^{-6})、高 Ni(平均 125×10^{-6})的生特征,强调了“O”型埃达克岩是板块重熔熔浆和幔源楔相互作用的产物。而德兴斑岩体的相容元素含量较低, $\text{Mg}^\#$ 平均为 38.59 (图 9b);Cr 为 $(42.0 \sim 494.8) \times 10^{-6}$,平均 92.73×10^{-6} ,多数集中在 $(40 \sim 75) \times 10^{-6}$ 之间;Ni 为 $(13.46 \sim 79.036) \times 10^{-6}$,平均 25.88×10^{-6} 。表明德兴斑岩体是源自加厚下地壳的部分熔融,其混染源为中、上壳源物质,而较少混染有地幔物质。

(3) “O”型埃达克岩具 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.7040$, $\epsilon_{\text{Nd}} > 0$ 特征,同样代表“O”型埃达克岩的形成有地幔楔物质的参与。现有资料表明德兴花岗闪长斑岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 < 0.7040 , ϵ_{Nd} 则 < 0 ^[23,25,33],在微量元素球粒陨石标准化蛛网图上可见明显的负 Nb 异常谷。Jahn B M. 等^[56]研究认为,Nb 的负异常通常是典型陆壳岩石重熔的标志。因此,德兴斑岩体上述 Sr、Nb 同位素地球化学特征表明其岩浆的形成演化过程中有地壳物质的混染。

(4) “O”型埃达克岩的源区残留相为榴辉岩,而德兴花岗闪长斑岩的源区残留相为角闪榴辉岩。正常情况下,HREE(特别是 Yb、Lu)在石榴石中的分配系数最大,而 Dy 和 Ho 在角闪石中的分配系数最大,当石榴石是源区主要残留相时,形成的熔体具有倾斜的 HREE 配分型式,其 $\text{Y}/\text{Yb} > 10$ 、 $(\text{Ho}/\text{Yb})_{\text{N}} > 1.2$;而当角闪石是源区主要残留相时,形成的熔体具有平坦的 HREE 配分型式,其 $\text{Y}/\text{Yb} \approx$

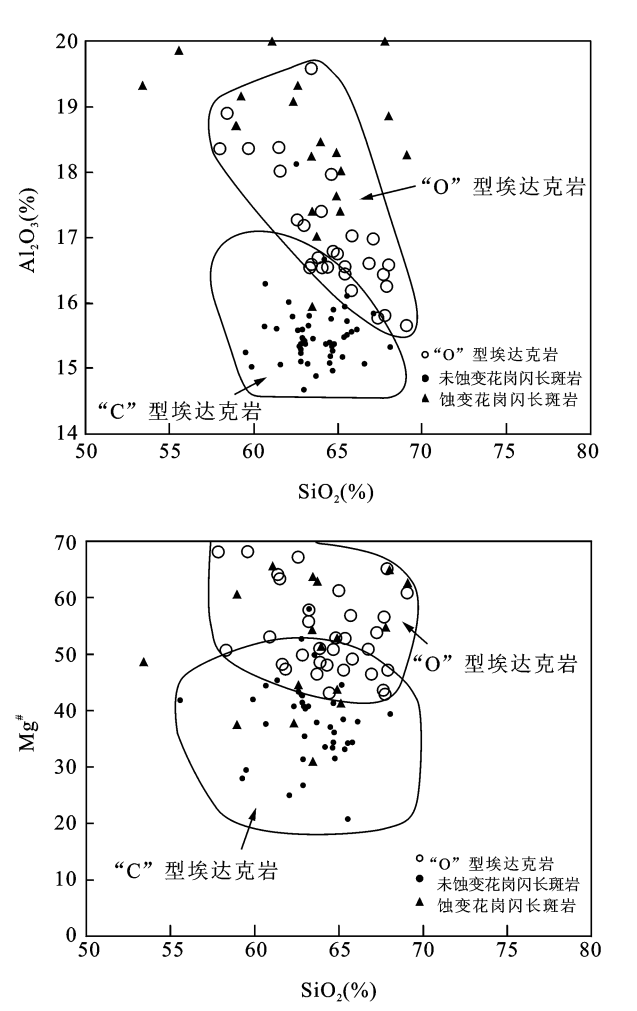


图 9 德兴含铜斑岩体“O”型埃达克岩与“C”型埃达克岩 SiO_2 - Al_2O_3 (a) 及 SiO_2 - $\text{Mg}^\#$ (b) 对比图
Fig. 9 SiO_2 - Al_2O_3 (a) and SiO_2 - $\text{Mg}^\#$ (b) comparison diagrams between “O” type adakites and “C” type adakites from the Dexing copper-bearing porphyries

“O”型埃达克岩数据来自文献^{[39],[47],[49-53]}

10 、 $(\text{Ho}/\text{Yb})_{\text{N}} \approx 1$ 。德兴斑岩强烈亏损 HREE ($4.21 \sim 13.93$) $\times 10^{-6}$,指示其源区残留相中有石榴石;而 Y/Yb 为 $6.71 \sim 11.89$,平均 9.37 ,以及 $(\text{Ho}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $0.95 \sim 2.16$,平均 1.23 ,表明德兴斑岩的源区残留相中存在有石榴石和角闪石,即为角闪榴辉岩相。此点也体现在斑岩体 Rb 元素相对 Ba 元素较为富集上,因为角闪石中 Ba 的分配系数高于 Rb, Ba 相对 Rb 亏损代表了源区角闪石是残留物之一。德兴斑岩体样品在图 8 的投影点靠近石榴石角闪岩或角闪榴辉岩部分熔融曲线,暗示其熔体来自上述两者,而非更深处的 ($75 \sim 85\text{km}$) 地幔榴辉岩。

综上,德兴花岗闪长斑岩地球化学特征较“O”型埃达克岩有一定区别,与“C”型埃达克岩一致,因此认为德兴花岗闪长斑岩为“C”型、高钾钙碱性埃达克岩。

3 岩石成因及地质意义

3.1 岩石成因

根据 Defant 等提出的定义,“O”型埃达克岩形成于岛弧环境,来源于年轻的($\leq 25\text{Ma}$)、热的俯冲洋壳板片部分熔融。模拟实验表明与地幔正常的脱水熔融作用相比,形成于俯冲板片熔融作用的埃达克岩浆一般发生在更浅的部位^[44]。只有在俯冲作用初期阶段,洋壳板片在火山弧下接近 75~85km 深度(相当于角山岩相向榴辉岩相过渡地带)时发生部分熔融,才能形成埃达克岩浆,而当深度达 120~150km 时则形成正常的岛弧火山岩浆^[57](相当于榴辉岩相带)。对于“C”型埃达克岩形成的构造环境,目前认为在活动陆缘的地壳加厚区、板块碰撞导致的地壳加厚区、高原底部均可以发现,地壳加厚是形成“C”型埃达克岩的必要条件^[58]。这种由加厚地壳部分熔融形成的埃达克岩常发生在造山作用的后碰撞阶段,其构造体制处于碰撞期后的拉张环境。在此构造应力下,热的软流圈地幔物质上涌,由来自地幔的热供给,使下地壳部分熔融形成埃达克岩^[59]。

“C”型埃达克岩有 3 种可能成因模型^[46]: (1) 底侵至下地壳底部的幔源玄武质岩石部分熔融; (2) 大陆下地壳拆沉作用,被拆沉的下地壳沉入地幔,受下部软流圈的加热,导致其熔融形成埃达克岩浆; (3) 加厚下地壳底部的中、基性岩部分熔融。第(1)和(2)种模式均有地幔物质的参与,前已述及,德兴花岗闪长斑岩具较低的 $\text{Mg}^\#$ 值(平均 38.59),普遍较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(> 0.7040),亏损相容元素 Cr

(平均 92.73×10^{-6})、Ni(平均 25.88×10^{-6}),以及负的 ϵ_{Nd} 值等特征,表明其岩浆形成过程中未受到或较少受到地幔物质的混染。同时,德兴斑岩体严重亏损 HREE 和 HFSE,较低的 Y/Yb (≈ 10)和较高的 $(\text{Ho}/\text{Yb})_{\text{N}}$ (> 1.23)表明斑岩的熔融残留相为角闪榴辉岩, Sr/Y -Y 图解和 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ - Yb_{N} 图解说明其熔体来自石榴石角山岩或角闪榴辉岩。因此,德兴的“C”型埃达克岩的成因模型是第(3)种,即形成于加厚下地壳底部的中、基性岩部分熔融,其生成深度大致在 40~50km。加厚下地壳的熔融能够形成埃达克岩已获得相关实验岩石学资料证实^[60-61],通过在不同压力条件下对变玄武岩、高铝玄武岩、天然低钾钙质角闪岩、角闪岩等进行的高压熔融实验,表明高压($> 1\text{GPa}$)条件下当石榴子石为残留相时,熔体出现强烈的重稀土亏损和诸多类似埃达克岩的地球化学特征。

印支期构造旋回是我国乃至全球挤压造山运动最为剧烈的时期,在此期间江南造山带发生自南东向北西的挤压逆冲,元古代浅变质基底岩系和古生代盖层岩系相互叠置、缩短并隆升。因此认为,在印支期构造挤压造山作用后出现了地壳加厚。燕山期造山运动逐渐停止,古太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲,形成了活动大陆边缘环境,德兴地区大地构造环境开始由挤压造山转变为陆缘弧后伸展拉张阶段,而加厚的高密度下地壳因构造伸展而减压发生部分熔融形成埃达克岩浆,伴随区域内断裂带的活动,发生岩浆侵入与喷发,从而形成埃达克岩。图 10 中主元素构造环境图解显示德兴埃达克岩投影落

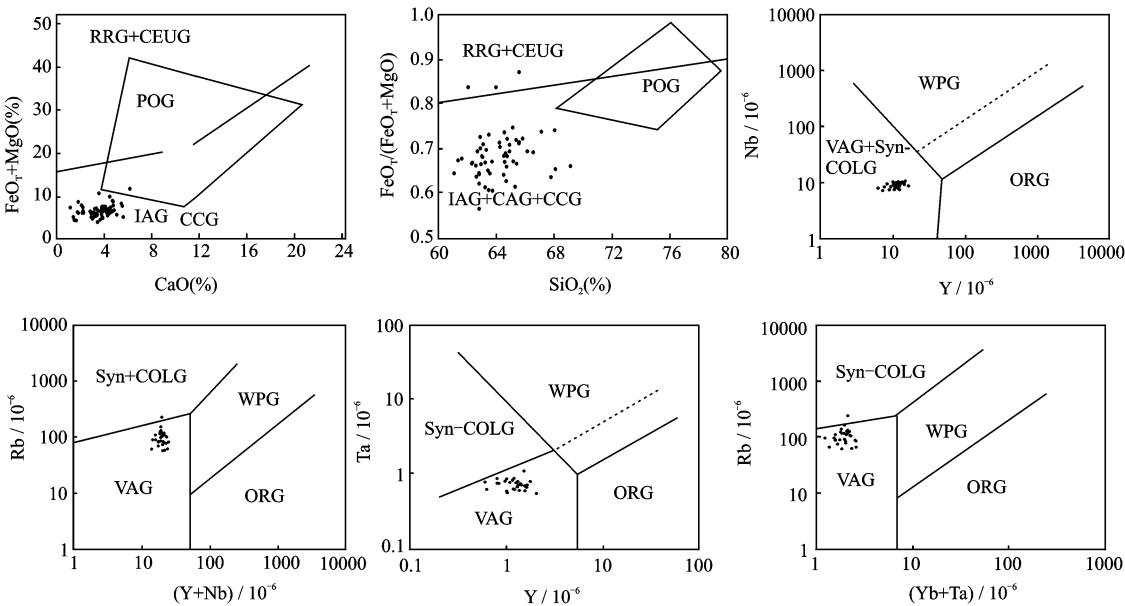


图 10 德兴含铜斑岩体构造环境图解(底图据文献[62-63])

Fig. 10 Tectonic setting discrimination diagrams of the Dexing copper-bearing porphyries

IAG-岛弧花岗岩; CAG-大陆弧花岗岩; CCG-大陆碰撞花岗岩; POG-造山期后花岗岩; RRG-与裂谷有关的花岗岩类; CEUG-陆内造陆升降运动花岗岩类; ORG-洋中脊花岗岩; VAG-陆缘弧花岗岩; WPG-板内花岗岩; syn-COLG-同碰撞花岗岩

入 IAG+CAG+CCG 区内,微量元素构造环境判别图解中投影落入 VAG 区内,表示其为与活动大陆缘相关花岗岩,说明德兴埃达克岩发育于活动大陆边缘,由挤压碰撞造山而形成的加厚地壳熔融而来。

3.2 地质意义

由于“C”型埃达克岩形成于地壳加厚-拆沉减薄动力学背景,因此有特殊的地质意义:(1)可用于追踪地质历史上地壳加厚事件,指示区域构造应力转变的时间,是地壳开始减薄的标志。德兴燕山期埃达克岩的发现,证实了中国东部地区存在印支期的地壳加厚,而早侏罗世末—中侏罗世埃达克岩的形成(157~193Ma)代表加厚地壳发生熔融。(2)表明德兴地区在燕山早期发生下地壳拆沉作用,可用揭示壳幔相互作用的信息。埃达克岩浆的熔出使大量低密度的中酸性物质移出下地壳,使下地壳密度增加甚至超过下伏地幔,进而发生拆沉,将下地壳带入地幔中,从而发生壳幔互动。(3)德兴含铜花岗闪长斑岩为埃达克岩,说明埃达克岩与(超)大型斑岩型铜金矿床有一定成矿联系。实验研究表明,埃达克岩的形成需要很高的温度(850~1150℃)及压力(1.0~4.0GPa)^[64],同时在埃达克岩浆形成过程中,由于角闪岩相转化为榴辉岩相,可释放出大量水^[65]。较高的温度和压力,特别是富含热液流体,有利于金属元素的萃取和迁移,并在适当的条件下富集成矿。

4 结论

德兴花岗闪长斑岩主量元素具有高硅、高铝、低镁的特征,斑岩富钾贫钠,较高的 K_2O/Na_2O 比值,为高钾钙碱性系列;稀土特征表现为轻稀土富集,重稀土亏损,微量元素表现为富集大离子亲石元素 LILE(Rb、Ba、La、Sr)和亏损高场强元素 HFSE(Nb、Ta、Y),具低 Y 和 Yb 含量特征,有较高 Sr/Y、La/Yb 比值,较高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值(>0.7040),以及负的 ϵ_{Nd} 值等特征,表明德兴花岗闪长斑岩为“C”型、高钾钙碱性埃达克岩。

德兴“C”型埃达克岩的发现,表明该地区受印支期碰撞造山的影响而存在下地壳加厚现象。至燕山早期(157~193 Ma),区域构造应力由挤压开始转变为伸展,德兴埃达克岩即来源于此背景下加厚下地壳中、基性岩的部分熔融。德兴埃达克岩的存在也说明该地区在埃达克岩浆熔出之后可能有拆沉作用的发生。

德兴花岗闪长斑岩具蚀变分带性,位于岩体中心的新鲜斑岩体具有典型的“C”型埃达克岩地球化学特征,而外围遭受有绿泥石化、伊利石化、硅化、绢云母化的蚀变斑岩体发生有明显的元素迁移,伴随 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量增加, TiO_2 、 FeO 、 Na_2O 及 Sr 含量减少,使得蚀变斑岩体缺失埃达克岩的某些地球

化学特征。因此在利用地球化学数据判别埃达克岩时需考虑岩体的蚀变类型和蚀变程度,以免混淆。

埃达克岩与浅成低温热液金银矿及斑岩型铜金矿床有密切关系,德兴斑岩铜矿与环太平洋斑岩成矿带中多数大型和世界级的斑岩铜矿一样与埃达克岩有关。但埃达克岩的成矿机理和成矿作用方式目前尚不清晰,需加强研究。

参考文献

- [1] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347: 662-665.
- [2] 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示 [J]. *地质科学*, 2001, 36 (2): 248-255.
- [3] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义 [J]. *岩石学报*, 2001, 17 (2): 236-244.
- [4] 张旗, 王焰, 王元龙. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约 [J]. *岩石学报*, 2001, 17 (4): 505-512.
- [5] 李晓峰, 胡瑞忠, 韦星林, 等. 江西德兴地区主要矿床类型、成矿地质特征及其成因关系 [J]. *地质论评*, 2012, 58 (1): 82-90.
- [6] 王翠云, 李晓峰, 肖荣, 等. 德兴铜厂斑岩铜矿脉体类型、分布规律及其对成矿的指示意义 [J]. *矿床地质*, 2012, 31 (1): 94-110.
- [7] 潘小菲, 宋玉财, 李振清, 等. 德兴铜厂斑岩铜(钼金)矿床蚀变-矿化系统流体演化: H-O 同位素制约 [J]. *矿床地质*, 2012, 31 (4): 850-860.
- [8] 王翠云, 李晓峰, 肖荣. 德兴朱砂红斑岩铜矿热液蚀变作用及元素地球化学迁移规律 [J]. *岩石学报*, 2012, 28 (12): 3869-3886.
- [9] Li Xiaofeng, Sasaki, M. Hydrothermal Alteration and Mineralization of Middle Jurassic Dexing Porphyry Cu-Mo Deposit, Southeast China [J]. *Resource Geology*, 2007, 57: 409-426.
- [10] Wang, C. Y., Li, X. F., Xiao, R., et al. Elements mobilization of mineralized porphyry rocks during hydrothermal alteration at Zhushahong porphyry copper deposit, Dexing district, South China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28 (12): 3869-3886.
- [11] 钱鹏, 陆建军. 德兴铜矿花岗闪长斑岩物质来源的微量元素研究 [J]. *地质找矿论丛*, 2005, 20 (2): 75-79.
- [12] 梁祥济. 江西德兴斑岩铜矿成矿物质来源的实验研究 [J]. *地质论评*, 1995, 41 (5): 463-472.
- [13] Zhou Qing, Jiang Yaohui, Zhang Huihua, et al. Mantle Origin of the Dexing Porphyry Copper Deposit [J]. *International Geology Review*, 2013, 55: 337-349.
- [14] 周清, 姜耀辉, 廖世勇, 等. Pb 同位素对德兴铜矿成矿物质来源的制约 [J]. *地质学报*, 2013, 87 (8): 1124-1135.
- [15] 周清, 姜耀辉, 廖世勇, 等. 德兴斑岩铜矿床研究新进展 [J]. *地质论评*, 2013, 59 (5): 933-940.
- [16] 金章东. 德兴铜厂斑岩铜矿床成矿流体地球化学及演

- 化[D]. 南京:南京大学,1999.
- [17] 华仁民,李晓峰,陆建军,等. 德兴大型铜金矿集区构造环境和成矿流体研究进展[J]. 地球科学进展,2000,15(5): 525-533.
- [18] 王蝶,毕献武,尚林波. 德兴铜矿花岗岩闪长斑岩成岩过程分异的初始岩浆流体 HF、HCl 浓度特征[J]. 矿物学报,2010,30(3): 331-337.
- [19] 姚静,倪培,赵葵东,等. 德兴铜厂斑岩铜矿成矿流体演化特征[J]. 矿物岩石地球化学通报,2012,31(2): 97-104.
- [20] 张天福,潘小非,杨丹,等. 德兴朱砂红斑岩型铜(金)矿床流体包裹体研究[J]. 矿床地质,2012,31(4): 861-880.
- [21] 刘玄,范宏瑞,胡芳芳,等. 江西德兴斑岩铜钼矿床流体包裹体矿物 SEM-EDS 研究及其对成矿流体性质的制约[J]. 岩石学报,2011,27(5): 1397-1409.
- [22] 吴德新,赵元艺,吕立娜,等. 江西德兴朱砂红斑岩铜矿流体包裹体特征及其成矿意义[J]. 地质学报,2013,87(5): 677-690.
- [23] 金章东,朱金初,李福春. 德兴斑岩铜矿成矿过程的氧、锶、钼同位素证据[J]. 矿床地质,2002,21(4): 341-349.
- [24] Zhou Qing, Jiang Yaohui, Zhao Peng, et al. Origin of the Dexing ore-bearing porphyries, South China: elemental and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints[J]. International Geology Review, 2012, 54: 572-592.
- [25] 王强,赵振华,简平,等. 德兴花岗岩闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学[J]. 岩石学报,2004,20(2): 315-323.
- [26] 周清,姜耀辉,廖世勇,等. 德兴铜矿闪长玢岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及原位 Hf 同位素研究[J]. 地质学报,2012,86(11): 1726-1734.
- [27] 水新芳,赵元艺,郭硕,等. 德兴矿集区花岗岩闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其意义[J]. 中国地质,2012,39(6): 1543-1561.
- [28] 蒋国豪. 氟、氯对热液钨、铜成矿的制约——以江西德兴铜矿、大吉山钨矿为例[D]. 北京:中国科学院研究生院,2004.
- [29] 毛景文,张建东,郭春丽. 斑岩铜矿-浅成低温热液银铅锌-远接触带热液金矿矿床模型: 一个新的矿床模型——以德兴地区为例[J]. 地球科学与环境学报,2010,32(1): 1-14.
- [30] 王强,赵振华,许继峰,等. 扬子地块东部燕山期埃达克质(adakite-like)岩与成矿[J]. 中国科学(D辑),2002,32(S): 127-136.
- [31] 李印,凌明星,丁兴,等. 中国东部埃达克岩及成矿作用[J]. 大地构造与成矿学,2009,33(3): 448-464.
- [32] 冷成彪,张兴春,陈衍景,等. 中国斑岩铜矿与埃达克(质)岩关系探讨[J]. 地学前缘,2007,14(5): 199-210.
- [33] 朱训,黄崇柯,芮宗瑶,等. 德兴斑岩铜矿[M]. 北京:地质出版社,1983: 1-336.
- [34] Liu Xuan, Fan Hongrui, Santosh M, et al. Remelting of Neoproterozoic relict volcanic arcs in the Middle Jurassic: Implication for the formation of the Dexing porphyry copper deposit, Southeastern China[J]. Lithos, 2012, 150: 85-100.
- [35] 吴利仁,李秉伦. 中国东部中生代两大类斑岩型矿床[M]. 北京:科学出版社,1991: 1-182.
- [36] 孙海田. 德兴铜矿、银山铜铅锌矿床的岩浆岩岩石化学特征及其成岩成矿机理探讨[J]. 中国地质科学院院报,1988,(18): 93-103.
- [37] Xiong X L, Xia B, Xu J F, et al. Na depletion in modern adakites via melt/rock reaction within the sub-arc mantle [J]. Chem Geol, 2006, 229(4): 273-292.
- [38] Defant M J, Xu Ji-feng, Kepezhinskas P, et al. Adakites: some variations on a theme[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(2): 129-142.
- [39] Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids [J]. Lithos, 1999, 46: 411-429.
- [40] Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. Lithos, 2005, 79: 1-24.
- [41] Taylor S R and McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 312.
- [42] Rollinson H. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation[M]. England: Longman Group UK Ltd. 1993: 352.
- [43] 张旗,王焰,李承东,等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报,2006,22(9): 2249-2269.
- [44] Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons [J]. Geophys Res, 1990, 95(B13): 21503-21521.
- [45] 吴福元,葛文春,孙德有. 中国东部燕山期“埃达克质岩”: 问题与意义[C]// 埃达克质岩及其地球动力学意义学术研讨会论文摘要. 北京, 2001: 53-55.
- [46] 张旗,许继峰,王焰,等. 埃达克岩的多样性[J]. 地质通报,2004,23(9/10): 959-965.
- [47] Morris P A. Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and aseismicity in southwest Japan [J]. Geology, 1995, 23: 395-398.
- [48] Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone [J]. Contrib Mineral Petrol, 1996, 123: 263-281.
- [49] Defant M J, Richerson M, De Boer J Z, et al. Dacite genesis via both slab melting and differentiation: Petrogenesis of La Yeguada volcanic complex, Panama [J]. Petrol, 1991, 32: 1101-1142.
- [50] Drummond M S, Defant M J, Kepezhinskas P K. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas [J]. Trans R Soc Edinb Earth Sci, 1996, 87: 205-215.
- [51] Aguillon-Robles A, Caimus T, Benoit M, et al. Late Miocene adakites and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: Indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California[J]. Geological Society of America, 2001, 29: 531-534.
- [52] Sajona F G, Maury R C, Bellon H, et al. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western

- and eastern Mindanao, Philippines[J]. *Geology*, 1993, 21: 1007-1010.
- [53] Kay S M, Ramos V A, Marques M. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America [J]. *J Geol*, 1993, 101: 703-714.
- [54] Yogodzinski G M, Volnetts O N, Koloskov A V, *et al*. Magnesian andesites and the subduction components in a strongly calc-alkaline series at Piip volcano, far western Aleutians [J]. *J Petrology*, 1994, 34: 163-204.
- [55] Kay S M, Ramos V A, Marques M. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America [J]. *J Geol*, 1993, 101: 703-714.
- [56] Jahn B M, Wu F Y, Lo C H. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust; geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic ultramafic intrusions of the northern Dabie complex central China [J]. *Chem. Geol.*, 1999, 157(122): 119-146.
- [57] Crosson R S, Owens T J. Slab geometry of the Cascadia subduction zone beneath Washington from earthquake hypocenters and teleseismic converted waves [J]. *Geophysical Research Letters*, 14: 824-827.
- [58] 朱弟成, 潘桂棠, 段丽萍, 等. 埃达克岩研究的几个问题 [J]. *西北地质*, 2003, 36(2): 13-19.
- [59] 朱弟成, 段丽萍, 廖仲礼, 等. 两类埃达克岩 (Adakite) 的判别 [J]. *矿物岩石*, 2002, 22(3): 5-9.
- [60] Rapp P R, Shimizu N, Norman M D, *et al*. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa [J]. *Chem. Geol.*, 1999, 160: 335-356.
- [61] Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: effects of temperature and time [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1994, 115: 369-383.
- [62] Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101: 635-643.
- [63] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25: 956-983.
- [64] Rapp P R, Xiao L, Shimizu N. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(3): 293-302.
- [65] Kay S M, Mpodozis C. Central Andean ore deposits linker to evolving shallow subduction systems and thickening crust [J]. *GSA Today*, 2001, 4-9.

Geochemical characteristics, petrogenesis and its geological significance of adakitic porphyries from the Dexing copper deposit, Jiangxi Province

WENG Wang-fei, DING Yong

(332 Geological Team of Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration of Anhui Province, Huangshan 245000, China)

Abstract: The Dexing porphyry copper deposit is located to the eastern part of Jiangnan paleouplift in the Yangtze landmass, and the rock type of copper-bearing porphyries is granodiorite porphyry with the major mineral assemblage consisted of plagioclase (andesine, oligoclase) + quartz + potassium feldspar + hornblende + biotite and some accessory minerals consisted of magnetite, apatite, titanite, ilmenite and zircon. The granodiorite porphyries are geochemically characteristic of higher silicon ($\text{SiO}_2 = 63.59\%$), higher aluminum ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.54\%$), lower magnesium ($\text{MgO} = 2.2\%$), and are rich in potassium and poor in sodium ($\text{K}_2\text{O} = 3.06\%$; $\text{Na}_2\text{O} = 3.67\%$) with higher $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio (0.89), rocks belong to weak peraluminous high-K calc-alkaline series, $\text{ALK} = 6.66\%$, $\text{A}/\text{CNK} = 1.086$, $\sigma = 2.18$, $\text{A.R} = 2.07$, showing that the rocks belong to weak peraluminous high-k calc-alkaline series. The granodiorite porphyries are obviously rich in LREE ($\text{LREE} = 121.81 \times 10^{-6}$) and LILE (Rb, La, Ba, Sr), and depleted in HREE ($\text{HREE} = 8.8 \times 10^{-6}$) and HFSE (Nb, Ta, Y), with higher LREE/HREE ratio (13.93). The geochemical characteristics of trace elements are show by lower Y (11.21×10^{-6}) and Yb (1.23×10^{-6}), and with higher Sr/Y (57.29) and La/Yb (28.93), higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (> 0.7040) and weakly negative Eu anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.91$) negative ϵ_{Nd} . Through the analysis of petrological and geochemical characteristics, it is considered that the Dexing granodiorite porphyries belong to the "C" type high-K calc-alkaline adakites, which were formed from partial melting of the thickened lower crust at active continental margin.

Key words: granodiorite porphyry; adakite; geochemical characteristics; petrogenesis; geological significance; Dexing

